

# 自适应重复学习算法在岩土动态应力试验中的应用

杨凯杰<sup>1</sup>, 徐志祥<sup>1</sup>, 柳 恒<sup>1</sup>, 范永波<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 岩土实验机的执行机构与被压试样都具有非线性、时变特性, 针对周期性动态应力波形的跟踪问题, 在结合传统PID控制算法基础上, 提出一种自适应重复学习控制算法。依据不同的控制过程增加了不同的计算模型和控制参数, 进而设计了自适应重复学习控制器, 通过斜率差值法和误差均值法对比例增益和偏差进行自适应调整, 通过重复学习对自适应结果进行优化。通过实际实验验证了该算法的稳定性和收敛性, 从而保证了非线性负载所承受的动态应力能够准确跟踪设定的动态波形。目前, 该算法已应用于1000 kN多功能三轴试验仪正弦波和三角波的波形跟踪。

**关键词:** 岩土力学; 动态试验; 应力控制; 自适应控制器; 重复学习算法

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2017)10-0059-05

## Application of Adaptive Repeated Learning Algorithm In Dynamic Stress Test of Rock and Soil

YANG Kai-jie<sup>1</sup>, XU Zhi-xiang<sup>1</sup>, LIU Heng<sup>1</sup>, FAN Yong-bo<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The actuators of the geotechnical experiments machine and the pressured samples have the characteristics of non-linear and time-varying. So, for the periodicity tracking problem of the dynamic stress waveforms, an adaptive repetitive learning control algorithm is proposed based on the traditional PID control algorithm. Different calculation models and control parameters are added according to the different control processes. Furthermore, an adaptive repetitive learning controller is designed. The proportional difference method and the error mean method are used to adaptively adjust the proportional gain and the deviation, and the adaptive results are optimized by repetitive learning. The stability and convergence of the algorithm are verified by practical experiment, which ensures that the dynamic stress of the nonlinear load can accurately track the set dynamic waveform. At present, the algorithm has been applied to waveform tracking of sine wave and triangular wave for 1000 kN multi-function triaxial test instrument.

**Key words:** geotechnical mechanics; dynamic test; stress control; adaptive controller; repetitive learning algorithm

当前岩土工程力学的研究主要依赖于细致而复杂的力学试验, 通过试验仪控制软件对三轴试验仪进行精确的位移、应力等控制, 来模拟真实的工程和自然状况。岩土力学特性的研究主要应用于土木工程和地

震、滑坡等自然灾害预测领域<sup>[1]</sup>。研究结果的准确性是保证工程稳定可靠和自然灾害准确预测的必要条件, 意义重大。

自适应控制技术能够有效地处理参数不确定动态系统的控制问题。自适应控制器可实现在线调整控制参数, 使得闭环系统能具有自适应能力。至今, 自适应控制已取得丰富成果。重复控制特别适用于周期已知的周期信号的追踪控制。本文以饱和沙石负载为例, 研究控制其所承受的应力跟随周期性正弦波和三角波波形运动的动态控制算法及应用。由于岩土试样都具有典型的复杂性、不确定性和非线性的特点, 对应力控

收稿日期: 2016-12-21

项目基金: 国家自然科学基金(11302229)

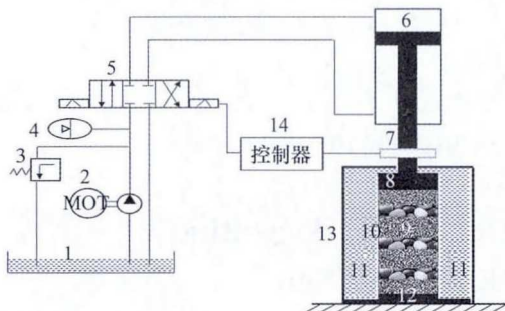
作者简介: 杨凯杰(1990—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要研究方向为自动化控制技术; 徐志祥(1965—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为数控与伺服控制技术, 精密光学测试及虚拟仪器技术等。

制影响巨大<sup>[2-4]</sup>,而阀控液压缸系统又具有典型的非线性、时变、时滞特性,更加加大了控制难度<sup>[5-6]</sup>,因此,在大量实验的基础上提出了一种新型自适应重复学习控制算法,应用于动态应力控制,使负载承受的应力在追踪设定的波形时精度高、响应速度快、稳定性好。

## 1 系统描述

### 1.1 系统工作原理

如图1所示是三轴试验仪主油缸实验机系统。



1—油箱;2—单向液压泵;3—比例溢流阀;4—蓄能器;  
5—电液伺服阀;6—非对称液压缸;7—拉压负荷传感器;  
8—试样压头;9—实验试样;10—橡胶囊;11—用来隔离  
试样的围压水;12—试样底座(有柔性性和刚性两种);  
13—围压室;14—控制器

图1 系统原理图

控制过程中先调整比例溢流阀,将系统压力调整到需要的大小,启动单向液压泵,通过水围压伺服阀控制试样水围压维持在规定的应力,通过拉压负荷传感器测得试样承受的应力,通过控制器进行闭环调控,控制非对称液压缸进行往复运动,使试样所承受应力追随动态波形变化,完成试样的动态应力控制过程。

### 1.2 系统特性分析

阀控非对称液压缸液压系统具有非线性、时变和时滞特性。系统中电液伺服阀的死区特性和液压缸的摩擦力往往是造成非线性和时滞特性的原因<sup>[6-7]</sup>。而系统的时变特性主要是由外负载的非线性特性和液压系统的不稳定性造成的。

实验中负载是沙石混合体材料,控制对象是负载所承受的应力。在控制过程中,岩土应力应变等力学特性会随控制时间的推移而发生不确定性变化。其中应力时间变化曲线如图2所示,可见其非线性特性。

由系统原理图可知,非对称液压缸是立式安装。非对称液压缸的结构决定了液压缸活塞在进程和回程两个阶段中液压油作用面积不同<sup>[8]</sup>;其次,活塞和活塞杆的质量更增加了进程和回程运动过程的不对称性,对于需要频繁往复的动态应力控制过程而言,其影

响不可忽略。

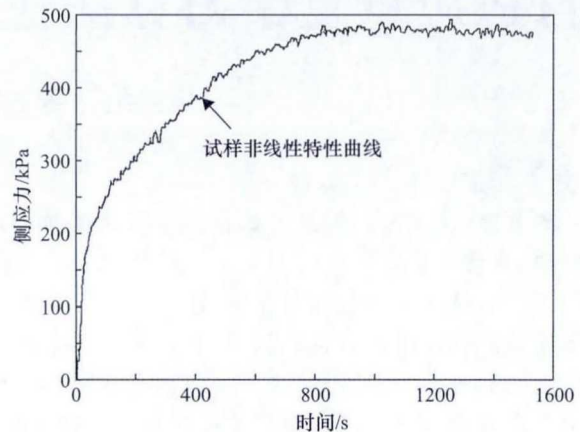


图2 应力-时间变化曲线

由于控制系统的以上特性,在频繁往复动态应力控制过程中造成的具体影响为:将会延长控制所需时间,造成理想波形与实际波形有相位差;采用相同控制参数时,波形上升阶段和下降阶段波形误差差别巨大,不能同时达到实验要求。

## 2 应力控制算法

### 2.1 带静态补偿的双模态PD控制算法

通过进行传统PID控制实验,发现由于电液伺服阀的死区特性和液压缸的摩擦力作用,直接将PID控制算法应用于阀控缸系统是不行的。

为补偿电液伺服阀的死区特性和液压缸的摩擦,在传统PID基础上添加一个补偿项,控制器输出为

$$V = u(k) + \delta \quad (1)$$

$$\delta = \begin{cases} \delta_+, & u(k) > 0 \\ 0, & u(k) = 0 \\ \delta_-, & u(k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $V$ 为控制电压; $u(k)$ 为PID计算的控制电压; $\delta_+$ 和 $\delta_-$ 为补偿偏差。通过在PID控制器输出信号上叠加一个足够大的常量,从而帮助控制信号脱离死区。

由于整套液压缸活塞杆、拉压式负荷传感器和压头质量巨大,如果活塞杆的进程和回程采用相同的控制参数,难以同时取得较佳的控制效果。

因此,在动态波形的上升周期和下降周期采用不同的控制参数,即双模态控制<sup>[9-10]</sup>。同时,由于PID控制算法中积分作用会降低系统响应速度,所以,采用PD控制。算式为

$$u(k) = \begin{cases} K_{p1}e(k) + K_{D1}[e(k) - e(k-1)], & \frac{T}{2} \leq t \\ K_{p2}e(k) + K_{D2}[e(k) - e(k-1)], & \frac{T}{2} > t \end{cases} \quad (3)$$

式中, $T$ 为周期; $t$ 为时间; $k$ 为波形离散周期中第 $k$ 个

点;  $u(k)$  为波形第  $k$  点的控制值,  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $N$  为波形一个周期的拟合点数;  $K_{p1}$ 、 $K_{d1}$  为上升周期控制参数;  $K_{p2}$ 、 $K_{d2}$  为下降周期控制参数;  $e(k)$  为误差。通过在上升周期和下降周期采用不同的控制参数, 在一个周期的上升区间和下降区间可同时取得满意的控制结果。

## 2.2 自适应重复学习控制器设计

由于系统鲜明地分为上升和下降两个周期, 自适应重复学习也分为上升和下降两个周期进行参数的自适应重复学习优化, 则接下来以上升周期为例说明自适应重复学习控制器的设计方法。

针对本非线性离散时变系统, 通过大量的调试经验得出, PD 控制中参数  $K_p$  在波形的幅值、频率和围压的变化过程中数值变化很小, 可作定参数处理。因此, 自适应重复学习过程只需更新参数  $K_p$  和  $\delta$ , 其中  $\delta$  为静态补偿偏差值。

假定在每个重复控制周期  $[0, T/2]$  内有  $N$  个实际离散点控制值  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ ,  $\dots$ ,  $(x_N, y_N)$ 。在控制过程中将前  $k$  个点拟合成直线  $y_k = K_k x + b$ , 其中  $k$  是当前运行点,  $0 < k \leq N$ ,  $T$  是波形周期。则

$$\sum_{i=0}^k (Y_i - kX_i) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^k (Y_i - b - kX_i) X_i = 0 \quad (5)$$

通过最小二乘法拟合直线解得拟合直线参数:

$$K_k = (k \sum_{i=0}^k Y_i X_i - \sum_{i=0}^k Y_i \sum_{i=0}^k X_i) / [k \sum_{i=0}^k (X_i^2) - (\sum_{i=0}^k X_i)^2] \quad (6)$$

通过计算机对数据进行实时处理, 可以计算出在半个周期  $[0, T/2]$  内前  $k$  个点拟合直线的斜率, 进而可计算出前  $k$  个点的拟合直线斜率与理想波形斜率的差值  $K_e = K - K_k$ , 根据斜率差值对控制参数  $K_p$  进行自适应,  $K_p$  的增量  $\Delta P \propto \lambda K_e$ , 其中  $\lambda > 0$  是经验参数,  $K$  是周期波形中第  $k$  个点的切线斜率, 在三角波时  $K$  为恒定值。

$\delta$  产生的原因是系统油缸的泄露、摩擦和死区等因素。 $\delta$  的自适应优化依赖于前  $k$  个点的实际值与理想值的差  $e(1), e(2), \dots, e(k)$ , 将  $\delta_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e_i$  作为修正值的参考。通过大量调试经验可以得到,  $\delta_k$  过小则实际波形与理想波形的拟合度低,  $\delta$  过大则使系统产生振动。因此, 取前  $k$  个点的均值。其次取均值还有利于排除比例增益对  $\delta$  值变化的影响。则  $\Delta \delta \propto \mu \delta_k$ , 其中  $\mu > 0$  是经验参数。

在离散自适应控制的基础上, 考虑把重复学习控制与自适应控制有效结合, 形成自适应重复控制理论。由于追踪目标曲线是周期性重复波形, 则可充分利用

先验经验, 通过重复学习来优化控制结果。重复学习区别于迭代学习的地方在于是对重复周期的相同点进行周期性重复优化<sup>[11-13]</sup>, 即

$$u(k+T) = u(k) + U(e(k), k) \quad (7)$$

式中,  $k$  为离散系统一个周期内的某一点;  $T$  为波形周期;  $e(k)$  为误差值。

因此, 基于离散控制系统, 在时间域  $t \in [0, t_0 + kT]$ , 设计自适应重复学习算法控制器为

$$\Delta P = \lambda (K - K_k) \quad (8)$$

$$\Delta \delta = \frac{\mu}{k} \sum_{i=1}^k e \quad (9)$$

$$u(k) = \begin{cases} u(k-T) + (K_p + \Delta P)e(k) + K_d[e(k) - e(k-1)] + (\delta + \Delta \delta), & t \in [T, \infty) \\ (K_p + \Delta P)e(k) + K_d[e(k) - e(k-1)] + (\delta + \Delta \delta), & t \in [0, T) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $K_p, K_d, \delta$  为给定初始给定值;  $u(k)$  为波形第  $k$  点的控制值,  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

自适应重复学习遵循这样的重复学习规律: 参数  $u(k)$  的修正结果如果使得  $|e(k)| < |e(k-T)|$ , 则将  $u(k)$  作为  $u(k-T)$  存储, 否则仍然延用  $u(k-T)$ 。如果  $u(k)$  使得  $|e(k)| < \theta$ , 则存储  $u(k)$ , 且停止对  $k$  点的自适应重复学习优化以降低计算机的计算量, 其中  $\theta$  为允许偏差值。理想情况下可得到一组理想  $U(k) = \{u(k_1), u(k_2), u(k_3), \dots, u(k_N)\}$  能够实现一个周期内对理想波形跟踪误差都满足  $|e(k)| < \theta, k = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 试验系统

将该控制算法应用于多功能三轴试验机系统, 如图 3 所示。三轴试验机系统的相关参数如表 1 所示。

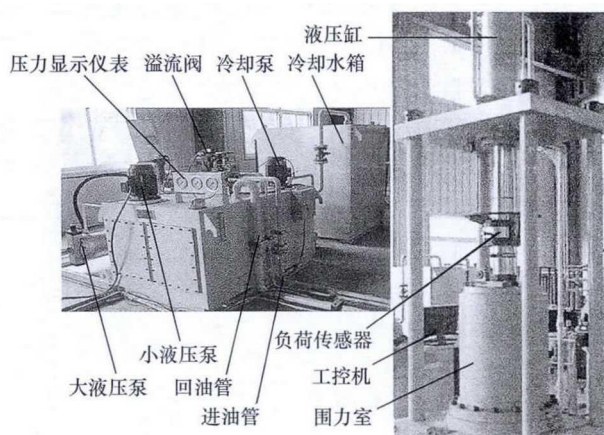


图3 三轴实验仪系统

根据动态控制波形的幅值大小, 选择启动小油泵进行应力加卸载及水围压应力维持, 同时选择小量程



10 t 拉压负荷传感器读取负载应力值。自适应重复学习 PD 控制算法中初始值  $K_p = 20$ ,  $K_d = 10$ ,  $\delta = 0.3$ , 经验参数  $\lambda = 0.0015$ ,  $\mu = 0.001$ 。波形控制误差收敛到  $|e(k)| < 5$  kPa。

表 1 系统参数

参数	参数值	参数	参数值
小液压泵出口压力	3 MPa	试样成分	沙石混合体
试样水围压压力	300 ~ 500 kPa	初始试样高度	550 mm
负荷传感器量程	10 t	初始试样体积	38.88 dm <sup>3</sup>
负荷传感器精度	5 kPa		

### 3.2 现场试验

在现场试验中分别对正弦波和三角波的动态波形进行了跟踪试验。试验中正弦波和三角波的波形频率范围为 0.1 ~ 0.5 Hz, 围压范围为 300 ~ 500 kPa, 波形幅值范围为 100 ~ 400 kPa。

标准波形的产生原理是通过若干个拟合而成, 由于系统时间精度原因, 两个点的产生时间间隔  $Q$  要大于 0.005 s。

因此, 正弦波标准信号拟合公式为

$$P = A \sin(2\pi f s Q) \quad (11)$$

三角波的标准信号拟合公式为

$$P = 2A f Q L \quad (12)$$

$$L = \begin{cases} L+1, & s < \frac{T}{2} \\ \frac{T}{Q} - (s \% (\frac{T}{Q})), & s > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $P$  为波形值;  $A$  为设定幅值;  $f$  为设定频率;  $s$  为当前点数;  $T$  为周期;  $\%$  为取余运算。

将该控制算法应用于图 3 所示的阀控液压缸系统, 取试验水围压为 400 kPa, 波形幅值为 200 kPa, 波形频率为 0.1 Hz 的三角波和正弦波数据进行误差分析, 其中图 4 和图 7 分别为三角波和正弦波前 5 个周期的输出波形。图 5 和图 8 为跟踪误差, 从图中可以看出, 跟踪误差经过 4 个周期后, 波形误差收敛于  $\pm 5$  kPa, 所以随着自适应重复次数的增加会达到更好的控制效果。图 6 和图 9 分别为三角波和正弦波前 5 个周期的跟踪误差统计直方图, 从图中可以看出, 误差主要集中在  $\pm 5$  kPa 之间, 满足实验要求, 同样, 随着自适应重复学习次数增加跟踪误差会更加集中。

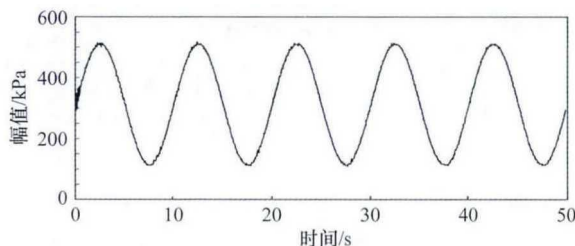


图 4 正弦波输出波形

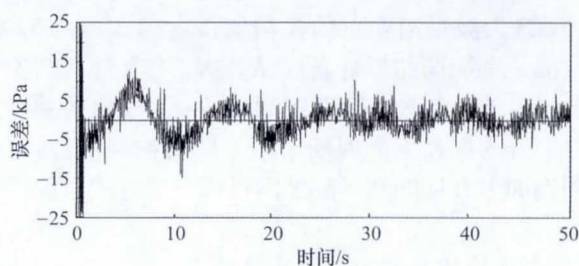


图 5 正弦波跟踪误差

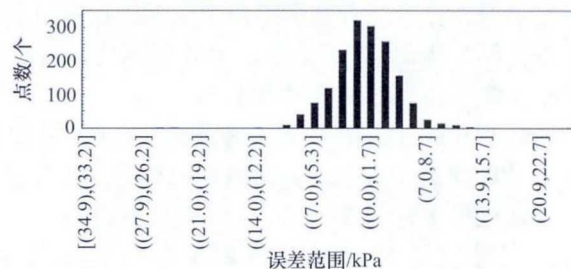


图 6 正弦波跟踪误差统计直方图

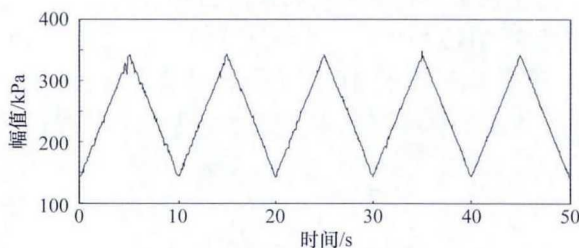


图 7 三角波输出波形

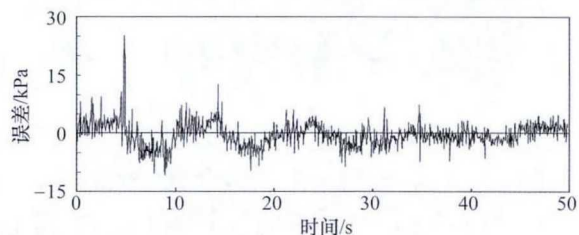


图 8 三角波跟踪误差

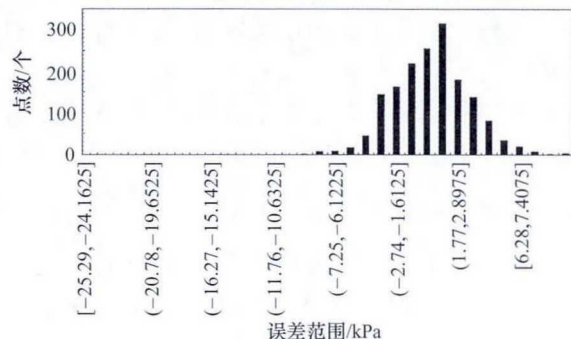


图 9 三角波跟踪误差统计直方图

为满足实验需要, 对试样围压在 300 ~ 500 kPa, 波形幅值在 100 ~ 400 kPa, 频率范围在 0.1 ~ 0.5 Hz 的正弦波和三角波进行了实验验证。部分软件截图如图 10 ~ 图 15 所示。

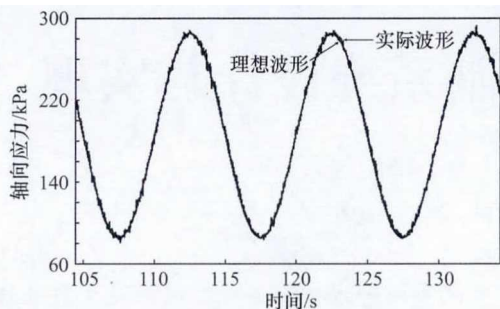


图 10 围压 300 kPa、幅值 100 kPa、频率 0.1 Hz 的正弦波

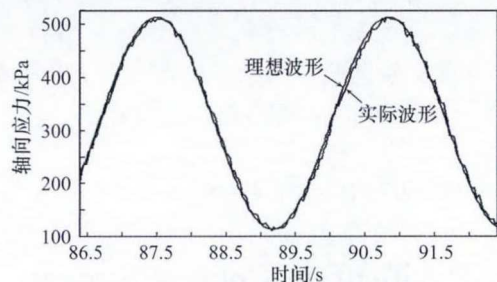


图 11 围压 400 kPa、幅值 200 kPa、频率 0.3 Hz 的正弦波

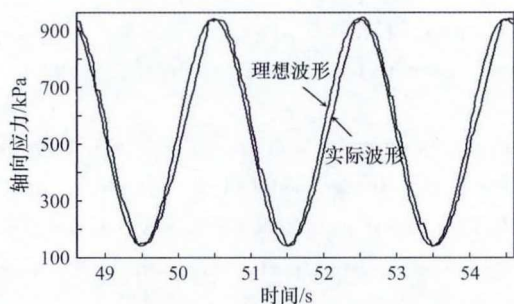


图 12 围压 500 kPa、幅值 400 kPa、频率 0.5 Hz 的正弦波

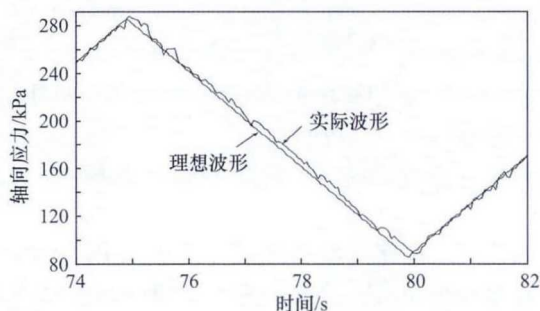


图 13 围压 300 kPa、幅值 200 kPa、频率 0.1 Hz 的三角波

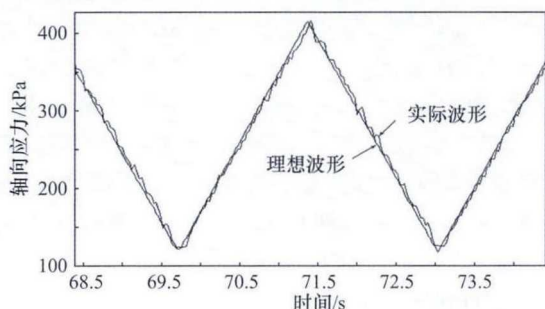


图 14 围压 400 kPa、幅值 300 kPa、频率 0.3 Hz 的三角波

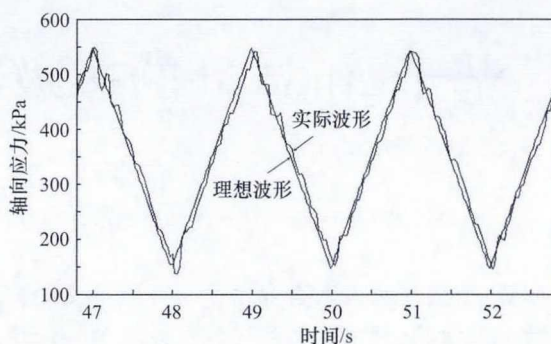


图 15 围压 500 kPa、幅值 400 kPa、频率 0.5 Hz 的三角波

从图中可以看出,经过有限次自适应重复学习运算之后,各围压、幅值和频率的波形跟踪稳定,经过计算波形频率在 0.1 ~ 0.5 Hz 范围内时,平均绝对误差  $|e(k)| = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |P - T| < 5 \text{ kPa}$ ,其中  $n$  为一个周期内的点数,  $P$  为波形的理想值,  $T$  为波形的实测值,  $|e(k)|$  满足实验要求。

## 4 结束语

为满足岩土力学试验中对负载所承受的应力进行动态控制的实验要求,提出了一种自适应重复学习控制算法。该算法不依赖控制系统模型,且继承了 PID 控制算法可靠性高、鲁棒性强的优点。同时,设计了自适应重复学习控制器,降低了系统机械延迟、伺服阀死区、液压缸泄露与摩擦和试样的非线性特性对应力控制精度的影响,且达到了对不同围压、幅值和频率的正弦波和三角波的跟踪目的,满足了试验要求。

## 参考文献:

- [1] 牛学超,张庆喜,岳中文. 岩石三轴试验机的现状及发展趋势[J]. 岩土力学,2013,34(2):600-607.
- [2] Sheng Q, Yue Z Q, Lee C F, et al. Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2002,39(2):165-184.
- [3] 沈珠江,陈铁林. 岩土力学分析新理论:岩土破损力学[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(上册). 2003.
- [4] 贺钢,蒋楚生. 边坡岩土工程不确定性及对策分析[J]. 铁道工程学报,2010,27(4):19-22,34.
- [5] 毛锐. 比例阀控液压缸系统的非线性特性及控制方法研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [6] 桑勇,邵龙潭. “动静三轴试验机”伺服加载系统研究[J]. 大连理工大学学报,2010,50(2):202-207.
- [7] 王玄,陶建峰,张峰榕,等. 泵控非对称液压缸系统高精度位置控制方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(4):597-602.

(下转第 68 页)



### 3 净水系统的测试与分析

最终构建多级净水控制系统如图 8 所示。图 9 为整个净水系统设计的控制电路箱结构图,电路箱中包括开关电源、空气开关、脱钩器、继电器、接触器和净水系统电路板,开关电源可以将 220 V 交流电转化为电路板和继电器可用的 12 V 直流电,空气开关分为手动开关和自动开关,脱钩器可实现手动开关和自动开关不同时闭合。当自动开关闭合时,净水系统进入到自动运行状态,在该状态下,净水系统可以自动采集入水 TDS、出水 TDS 和当前液面的高度,然后对水泵、气泵以及相应的电动阀进行调节。

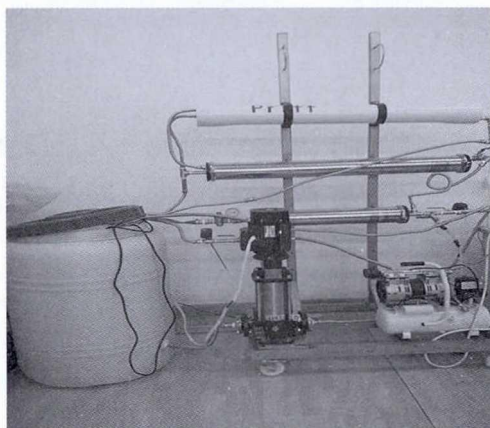


图 8 净水系统整体结构

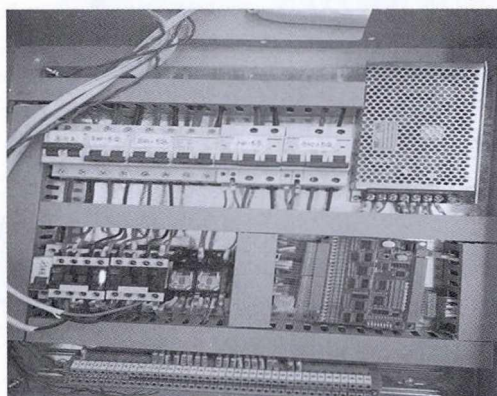


图 9 净水系统控制电路箱结构

在 MCSG 触摸屏方面,通过 Modbus 协议的实现,触摸屏可以对净水系统实时仿真,并能在触摸屏上对净水系统进行启动、停止和反冲洗,报警功能也很好地实现,对系统的现场控制取得很大的成效。

在远程控制方面,通过 WiFi 连接的 Android 手机,能很好地实现对净水系统的远程控制,还能监听每日用水量、TDS 指标和进行滤芯更换提醒等。

### 4 结束语

在反渗透膜快速发展的背景下,设计了基于 An-

droid 技术的多级净水控制系统,分别完成了净水系统结构设计、硬件电路设计、MCGS 触摸屏程序设计、服务器端软件设计和手机端应用程序设计等工作,并对净水系统净水功能、MCGS 触摸屏现场控制和 Android 手机端远程控制进行了测试。在净水方面,净水系统过滤后的水完全达到了生饮的标准,MCGS 触摸屏可以实时模拟净水器运行状态并超限报警,Android 手机端可以在远程对净水器进行监视和控制,实现了预期设计目标。

#### 参考文献:

- [1] 乔培培,陈丕茂,秦传新,等. 利用微生物净水研究进展[J]. 广东农业科学,2014,41(1):149-154.
- [2] 王静超,马军,王静海. 气浮净水技术在给水处理中的应用及研究概况[J]. 工业水处理,2004,24(7):9-12.
- [3] 李明,李雪飞,谭新. 超滤膜在饮用水净水工艺中的应用研究[J]. 资源节约与环保,2016(6):304.
- [4] 李二恩. 超滤膜净水工艺中自动控制系统的应用研究[D]. 太原:太原理工大学,2013.
- [5] 杨汉香,李燕. 自动反冲活性炭净水器处理饮用水的实验研究[J]. 净水技术,2005,24(4):56-57.
- [6] Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. Nature, 2008, 452:301-310.
- [7] 郑光熙. 基于单片机的便携反渗透净水系统[J]. 广东石油化工学院学报,2015(4):56-59.
- [8] 顾波飞,赵伟杰,吴开华. 基于 Modbus 协议的单片机与触摸屏通信设计[J]. 机电工程,2012,29(1):104-107.

□

(上接第 63 页)

- [8] 王杰,林忠万,李玉忍. 新型多模态 PID 控制算法在高精度位置伺服系统中的应用[J]. 电气传动,2005,35(3):33-35.
- [9] 张晓宁,王岩,付永领. 非对称液压缸对称性控制[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(11):1334-1339.
- [10] 陶永华,尹怡欣,葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1998:1-269.
- [11] Puglisi L J, Saltaren R J, Garcia C, et al. Robustness analysis of a PI controller for a hydraulic actuator[J]. Control Engineering Practice, 2015, 43:94-108.
- [12] Cheng Y, De Moor B L R. Robustness analysis and control system design for a hydraulic servo system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1994, 2(3):183-197.
- [13] 余林江. 离散时变系统自适应学习控制器的设计与实现[D]. 杭州:浙江工业大学,2012.

□